

NANOTEHNOLOGIJE KAO GLOBALNI ZADATAK ISTRAŽIVAČA 21. VEKA

Zoran Djurić

IHTM-Institut za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Beograd, Njegoševa 12, Srbija i Crna Gora

Plenarno izlaganje

Sadržaj – Pod nanotehnologijama se najčešće podrazumevaju prirodne nauke (uključujući bio i medicinske nauke), inženjering i tehnologije na nanonivou. S obzirom na široku interdisciplinarnost, odnosno činjenicu da su nanotehnologije isprepletane sa nizom disciplina (fizika, hemija, bionauke itd.), sveobuhvatnu definiciju teško je formulisati. Zbog toga je u ovom radu navedeno i analizirano nekoliko definicija iz američkih i evropskih izvora. Interdisciplinarnost je takođe i razlog što postoji relativno mali broj stručnjaka u oblasti. Pošto u svetu postoji konsenzus da će nanotehnologije u budućnosti prožimati svaki deo života, edukacija je zadatak od suštinskog značaja. U radu je prikazan istorijski razvoj nanotehnologija počev od čuvenog Fejnmanovog predavanja "There's plenty of room at the bottom" 1959. godine sve do današnjih dana. Nakon toga prikazan je očekivani napredak u raznim oblastima koje će nanotehnologije omogućiti. Poseban deo izlaganja vezan je za finansijska ulaganja u ovu oblast u svetu i kod nas. Dati su primeri iz kojih se može videti da nanotehnologije mogu da daju izuzetan doprinos dobrobiti čovečanstva. Na kraju izlaganja, navedeno je da sve zemlje s organizovanom naukom imaju nacionalne strategije i da su "nanonauke i nanotehnologije dugoročni cilj istraživača svih nacija u 21. veku". Na žalost, kod nas takva strategija još ne postoji.

1. UVOD

Osnovna ideja ovog rada je da domaćem stručnom auditorijumu predstavi jednu od ključnih tehnologija 21. veka. Nanotehnologije, koje se sada nalaze u početnoj fazi razvoja, zalaze u one oblasti koje su oduvek bile velike tajne; na koji način se formira materija polazeći od atoma i molekula. I može li se na taj način baš sve napraviti?

Razvijena društva već su uočila kakve koristi će imati od nanotehnologija i njihova ulaganja sve su veća i veća. Praktično sve zemlje sa organizovanom naukom danas imaju nacionalne programe u oblasti nanotehnologija [1]-[30]. Ti programi definišu proritetne oblasti istraživanja, a u skladu s njima planiraju se i realizuju nacionalne i međunarodne mreže i formiraju specijalizovani centri za određene oblasti nanotehnologija. Veoma važan segment je prenos konkretnih nanotehnologija u industriju, formiranje malih i srednjih preduzeća itd.

U vezi sa gornjim izlaganjem, jedan od problema je nedostatak stručnjaka u ovoj oblasti, pošto klasično obrazovanje i u Evropi i u Americi ne odgovara potrebama nanotehnologija. S obzirom na interdisciplinarnost, odnosno na to da su potrebna znanja i iz fizike, hemije, ali i iz

medicine i biotehnologija, mikroelektronike, mikrosistemskih tehnologija itd., u nekim zemljama edukacija u oblasti nanotehnologija počinje već u srednjoj školi [31].

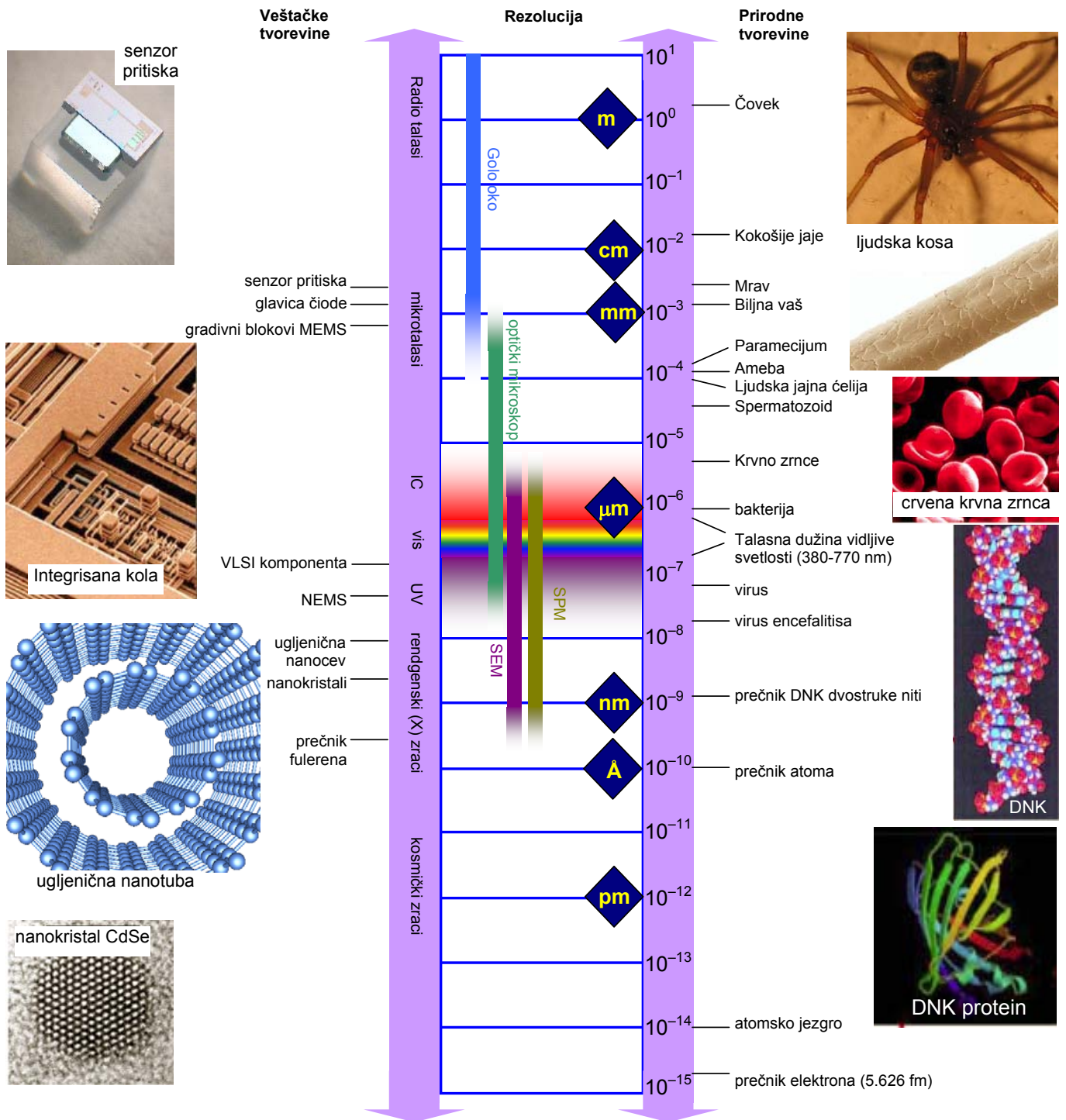
Kao i svaka tehnologija od koje se očekuju veliki prihodi, i nanotehnologije mogu da budu zloupotrebljene, između ostalog i tako što će još više povećati ekonomsku distancu između bogatih i siromašnih. Posebna opasnost preti od prisvajanja nekih znanja koja se nalaze u osnovi stvaranja i organizovanja života. Osim toga, postoje i problemi koji su povezani sa činjenicom da ova tehnologija može uticati i na životnu sredinu i na zdravlje ljudi. Tako npr. obična jedinjenja koja su neškodljiva mogu postati opasna na nanometarskim dimenzijama. Nanočestice mogu da prodru u ćelije tela i čak da prodju biološke barijere, takve kao što su blood-brain barijere.

Nerazumevanje ovih činjenica može dovesti do određenih zloupotreba, pogrešnih interpretacija i do negativnog stava društva prema nanotehnologijama. Ovaj problem se može rešiti samo edukacijom najširih društvenih slojeva.

U prvom delu rada bavićemo se definicijom nanotehnologija sa posebnim naglaskom na činjenicu da su sve te definicije dinamičke i da će se s vremenom menjati. U drugom delu govorićemo o istoriji nanotehnologija i komentarisati po nama najznačajnije događaje. U trećem delu razmotićemo šta se od nanotehnologija očekuje, koje oblasti će profitirati od korišćenja nanotehnologija, a nakon toga prikazaćemo ulaganja u ovu oblast, kao i neke primere postignutih rezultata. Biće, takođe reči o obrazovanju kadrova za nanotehnologije i na kraju ćemo govoriti o nanotehnologijama kod nas i dati određene preporuke u cilju formiranja jednog nacionalnog strateškog projekta kod nas.



Sl. 1. Rodonačelnik nanotehnologija, fizičar Ričard Fejnman



Sl. 2. Razmere mikro i nanosveta

2. DEFINICIJA NANOTEHNOLOGIJA

Značenje reči "nanotehnologija" teško je precizno odrediti. Norio Taniguchi sa Tokyo Science univerziteta je upotrebio ovu reč 1974. god. da bi označio "tehnologiju proizvodnje koja omogućuje visoku tačnost i ultrafine dimenzije, tj. preciznost i finoću reda 1 nm (10^{-9} m)". Ova reč je potom evoluirala i njom se označava sve od nauke manipulisanja atomima i molekulima do sinteze novih oblika života.

Mi ćemo ovde navesti nekoliko najčešće korišćenih definicija.

- Rad na atomskom i molekularnom i supermolekularnom nivou, na razmerama od približno 1-100 nm sa ciljem razumevanja, stvaranja i korišćenja materijala, naprava i sistema sa fundamentalno novim osobinama i funkcijama nastalim kao posledica njihovih malih dimenzija (M. Roco, 2004) [1]

- Nanotehnologije se odnose na manipulaciju živom i neživom materijom na nivou nanometra (10^{-9} m). U ovim razmerama klasična fizika prestaje da važi i zamenjuje je kvantna, a osobine gradivnih elemenata menjaju se na nove i nepredvidive načine. (Etc Group, *From Genomes to Atoms*, 2003) [24]
- Nanonauke se bave proučavanjem pojava i manipulacijom materijalima u atomskim, molekularnim i makromolekularnim razmerama, gde se osobine materijala znatno razlikuju od onih na većim razmerama.
- Nanotehnologije su projektovanje, karakterizacija, proizvodnja i primena struktura, naprava i sistema kontrolom oblika i veličine u nanometarskim razmerama. (Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2004) [8].

Prema S. Lenhert-u [32] najšira prihvaćena definicija može se naći na veb sajtu NASA-e.

- Kreiranje funkcionalnih materijala, uređaja i sistema preko kontrole materije u nanometarskim razmerama dužine (1-100) nm i korišćenje novih pojava i osobina (fizičkih hemijskih i bioloških) nastalih na ovim razmerama.

Komentarišući ovu definiciju S. Lanherth kaže: "Međutim, termini 'novi' i 'korišćenje' u ovoj definiciji nejasni su i suvišni. Npr. više nanotehnologija niti su nove (npr. nanočestice u drevnim srednjeameričkim bojama) niti su specifične za nanodimenzije (npr. samoasambliranje može da se obavi na različitim dimenzijama)." Iz tih razloga on definiše nanotehnologije kao:

- Primena nanonauke da bi se kontrolisali procesi na nanometarskim dimenzijama, tj. između 0,1nm i 100nm.

Budući da su nanotehnologije u ovom trenutku u početnoj fazi razvoja, ove definicije će verovatno i dalje evoluirati.

Na osnovu navedenih definicija, može se reći da nanotehnologije ne predstavljaju potpuno novu naučno-tehničku disciplinu. Ono što ih čini specifičnim jeste rad na razumevanju, otkrivanju i korišćenju različitih pojava koje nastaju na nivou nanostrukture i mogućnost upravljanja tim pojavama, nezavisno od toga da li je njihovo poreklo fizičko, hemijsko ili biološko i nezavisno od toga da li se radi o živom ili neživom svetu.

Nanotehnologije se nisu pojavile slučajno, one su nastale kada je napredak nauke stvorio niz mogućnosti za veštačko formiranje različitih struktura (materijala, naprava itd) na nanonivou.

Npr. kao posledica stalne potrebe, diktirane ekonomijom, smanjivanja dimenzija elementarnih komponenata integrisanih kola [19], [20], [33], osvojene su tehnologije nanolitografije, jonskog nagrizanja itd., koje ne samo što omogućuju fabrikaciju nanotranzistora (po ceni od 100 n\$/kom), već i niza mehaničkih struktura čije su dimenzije na nanonivou. Ove mehaničke strukture poseduju parametre koji su sada ostvareni prvi put u istoriji. Tako npr. izrađene su nanogređice za stabilizaciju frekvencije u

mikrotalasnim kolima čija rezonantna frekvencija prelazi 1GHz. Kao drugi primer, navodimo primer tehnologije formiranja epitaksijalnih slojeva metodom epitaksije molekularnim snopom. Ova tehnologija omogućava formiranje sa atomskom preciznošću i po nekoliko stotina kvantnih poluprovodničkih slojeva čije su dimenzije nanometarske i već se uveliko koristi kod dobijanja poluprovodničkih lasera i fotodetektora za optičke komunikacije i infracrvenu tehniku. Slični primeri postoje i u biotehnologijama.

Sa druge strane u tom "pripremnom periodu" napravljen je niz otkrića koja su omogućila da se ove strukture "vide" i karakterišu. Tu pored tradicionalnih metoda (rengenostrukturalna analiza) spadaju transmisioni i elektronski skenirajući mikroskop i veliki broj različitih mikroskopa sa skenirajućom sondom.

3. IZ ISTORIJE NANOTEHNOLOGIJA

Naš materijski svet sastavljen je od atoma. Ovu tvrdnju izrekao je pre 2400 god. grčki filozof Demokrit. Iako su dosta povezane sa pojmom atoma, nanotehnologije imaju mnogo kraću istoriju koju smo sa određenim komentarima prikazali u tabeli 1 [35]-[46].

Tabela 1. Hronologija razvoja nanotehnologija

1959.	Nobelovac, fizičar Richard Feynman održao je svoju poznatu besedu "There's plenty of room at the bottom", opisujući mogućnosti atomskog inženjeringa u budućnosti
1974.	Norio Taniguchi sa <i>Tokyo Science</i> univerziteta prvi put koristi reč "nanotehnologije"
1982.	Gerd K. Binning i Heinrich Rohrer sa IBM Zurich Research Laboratory izumeli su skanirajući tunelski mikroskop (scanning tunneling microscope) koji je omogućio istraživačima da prvi put vide atome i manipulišu njima. Nešto kasnije pronalazak mikroskopa atomskih sila (AFM) omogućio je pojavu velikog broja vrsta skanirajućih mikroskopa koji predstavljaju oči u nano-kosmos. Ovi istraživači dobili su Nobelovu nagradu za fiziku 1986.
1985.	R. F. Curl Jr, H. W. Kroto i R. E. Smalley otkrili su fulerene čije su dimenzije ~1 nm
1987.	Eli Yablonovitch sa UCLA otkrio je materijale sa fonskim energetskim procepom (fonski kristali)
1989.	Fizičari iz IBM nacrtali su logo svoje firme precizno postavljajući 35 atoma ksenona
1991.	Sumio Ijima, fizičar iz NEC research Labs u Japanu otkrio je višestruke ugljenične nanocevi

1993.	Rice University je osnovao prvu laboratoriju za nanotehnologije u USA
1998.	Istraživači sa Delft University of technology (Holandija) napravili su tranzistor sa nanotubama
2000.	Si tehnologija dostiže nanodimenzije, i dalje zadovoljavajući Moorov zakon
2000.	John Pendry sa Imperial College, UK predložio je "savršena sočiva" bazirana na metamaterijalima sa negativnim indeksom prelamanja
2000.	Predsednik SAD Clinton proglasio je National nanotechnology Initiative (NNI). Posle ovoga 40 drugih zemalja stavilo je nanotehnologije u svoje prioritetne programe
2001.	Mitsui & Co, Japan objavljuje planove za masovnu proizvodnju nanotuba
2002.	Nanotehnolozi IBM demonstriraju mogućnost zapisivanja podataka po kvadratnom inču koja odgovara hard disku od 100 GB – postaje moguće zapisati 25 miliona stranica na površini jedne poštanske marke
2002.	Srednja cena tranzistora dostiže vrednost 100 n\$, što je za 7 redova veličine manje nego 1968. godine.
2002.	EU pokreće šesti okvirni program (FP6) sa ukupnim budžetom od 17.5 milijardi €, pri čemu je za tematski prioritet 3 – nanotehnologije i nanonauke, multifunkcionalni materijali bazirani na znanju i novi proizvodni procesi i uređaji – 1.3 milijarde €.
2005.	EU predlaže sedmi okvirni program (FP7). Za tematski prioritet "Nanonauke, nanotehnologije, materijali i nove proizvodne tehnike" predviđeno trostruko povećanje budžeta, 4.8 milijardi €.

Veliki broj autora smatra da je sve počelo 1959. godine, kada je dobitnik Nobelove nagrade za fiziku Richard Feynman (Sl. 1) održao slavnu besedu "There is Plenty of Room at the Bottom" [35] opisujući mogućnost atomskog inženjeringa u budućnosti. Tom prilikom on je rekao: "Principi fizike, koliko ja mogu da vidim, ne govore protiv mogućnosti izgradnje stvari atom po atom. Ovim se ne narušava ni jedan zakon; to je nešto što se u principu može učiniti, u praksi ovo nije učinjeno jer smo mi preveliki... Na atomskom nivou mi imamo nove vrste sila, nove mogućnosti i nove efekte... Interesantno je, da će, u principu biti moguće (ja mislim) da fizičari sintetizuju bilo koju supstancu čiju formulu hemičari napišu..."

Ukoliko ponovo pogledamo prethodne definicije, videćemo da se one uveliko poklapaju sa citatom iz navedenog Fejmanovog rada.

U narednom tekstu komentarišaćemo samo neke događaje za koje nam se čini da su naročito značajni za dalji razvoj nanotehnologija. Tu svakako spada otkriće skenirajućeg tunelskog mikroskopa (STM) [47]. Ovaj mikroskop ima svoje preteče u tzv. profilometrima sa iglom (Stylus Profilometry) koji se koriste za analizu površine još od 1930. god. Sama ideja korišćenja tunelskog efekta za ispitivanje topografskih karakteristika površina predložena je 1966. god. od strane Rasela Janga (Russell Young). Uređaj je 1971. god. i realizovan i sadržao je sve karakteristične blokove koje ima STM. Ovaj uređaj je imao karakteristike koje su obezbeđivale atomsku rezoluciju na monokristalno orjentisanom grafitu. Ali, nažalost, grupa R. Younga takav zadatak sebi nije postavila i nije izvršila istraživanja u tom smeru.

G. Binning i H. Rohrer prvi su shvatili da se pomoću tunelskih sondi može postići atomska rezolucija pri ispitivanjima površine. Krajem 1978. oni su kao saradnici ciriškog odeljenja IBM kompanije napravili skenirajući tunelski mikroskop sa kojim je bilo moguće dobiti atomsku rezoluciju.

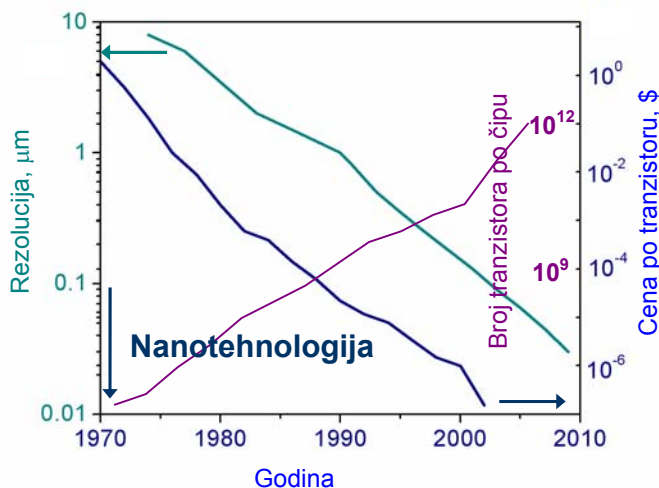
Pored istorijskog značaja otkrića STM kao instrumenta, treba reći da je ono na neki način dovelo do otkrića mikroskopa atomskih sila 1986. od strane G. Binning-a, C. F. Quate i C. Gerber-a ("Atomic Force Microscope") [48]. Ovo otkriće bilo je kombinacija principa STM i profilometra sa iglom. Kasnije je nastala velika familija mikroskopa sa skenirajućom sondom. Sa ovom tehnikom analizira se površina uzroka merenjem interakcije između vrha sonde i uzorka. Metoda omogućuje analizu površine i dielektrika što je bio i najveći problem STM.

1987. god. uveden je tzv. beskontaktni mod. U beskontaktnom modu mikrogredica osciluje blizu svoje rezonantne frekvencije na malom rastojanju (1-10) nm iznad površine uzorka. Sile dugog dejstva su privlačne sile koje deluju na gredicu indukujući promene u amplitudi, frekvenciji i fazi gredece pri čemu se obično pri skeniranju ispitivane površine održava konstantno rastojanje između vrha i površine. Pošto su sada sile koje deluju na uzorak mnogo manje nego kod kontaktnog moda, čak i najmekši materijali mogu da se snime i analiziraju bez oštećenja.

Drugi značajan događaj koji ćemo mi razmotriti odnosi se na trenutak kada je tehnologija inegriranih kola i poluprovodnika postala nanotehnologija, poznatija pod nazivom nanoelektronika. Značaj tehnologija poluprovodnika je ogroman, a najbolje se može sagledati iz sledećih podataka:

- industrija poluprovodnika sa svojom prodajom od 250 milijardi € (200 milijardi poluprovodnici i 50 milijardi materijali i oprema) predstavlja temelj ekonomije visokih tehnologija,
- poluprovodnici omogućuju da elektronika plasira svoje proizvode u oblast široke potrošnje, medicine, transporta, zaštite, kosmičkih istraživanja – 1100 milijardi €
- elektronika sa svoje strane omogućuje da servisi (telekomunikacije, Internet, radio i televizija) ostvare plasman od oko 5000 milijardi €.

U proteklom periodu od preko 40 god. tehnologija integrisanih kola napredovala je prema maksimi "manje, jeftinije, bolje", dosta dobro prateći u celom periodu poznati zakon G. E. Moore-a. [54]. Ovaj zakon kaže da broj elementarnih komponenata (tranzistora) u integrisanom kolu raste eksponencijalno dok se njihove minimalne dimenzije, takođe, eksponencijalno smanjuju (sl. 3).



Sl. 3. Trend tehnologije integrisanih kola prema Murovom zakonu: smanjenje rezolucije i cene i povećanje broja komponenti

Sa sl. 3 proizilazi i da se cena tranzistora u ovom periodu takođe eksponencijalno smanjivala (od negde nešto više od €1 u 1965 do oko 100 n€ u 2004. god.). Negde oko 2000. god. minimalne dimenzije tranzistora spustile su se ispod 100 nm. Detaljne analize pokazuju da će se sadašnja osnovna tehnologija integrisanih kola, koja koristi silicijumski CMOS tranzistor kao bazu, produžiti važenje Moore-ovog zakona do 2020. god [19], [20], [33]. Posle ovoga nastupiće nove tehnologije kao što su spintronika, korišćenje ugljeničnih nanocevi, nanožica, kvantnih tačaka itd.

Dakle, kao zaključak treba reći da je u ovom trenutku tehnologija integrisanih kola, kao jedna od nanotehnologija, tehnologija sa najvećim tržištem i sveukupnim uticajem na društvo u celini. Ne treba zaboraviti da je ona odigrala i još uvek igra glavnu ulogu u nastajanju i početnoj fazi razvoja nanonauka i nanotehnologija.

4. ZNAČAJ NANOTEHNOLOGIJA

Danas se smatra da su nanotehnologije jedna od ključnih tehnologija 21. veka [1]-[30] i očekuje se da će one obezbediti razvoj velikog broja sektora koji mogu poboljšati konkurentnost industrije, a samim tim poboljšati standard stanovnika.

Nanotehnologije su same za sebe bitan sektor. Očekuje se da će tržište nanotehnologija da poraste od 2,5 milijardi € u 2003. god. na nekoliko stotina milijardi € u 2010, da bi negde oko 2015. god. dostiglo vrednost od preko hiljadu milijardi €. Ovaj sektor još uvek nema ni porednika ni poraženih, EU i dalje ima šansu da bude lider.

Kao što je rečeno, nanotehnologije otvaraju mnoge mogućnosti. Očekuju se revolucionarne promene, npr. u

medicinsko-farmaceutskom sektoru i u informacionim tehnologijama.

Nanotehnologije doprinose održivom razvoju. Razvoj zasnovan na nanotehnologijama ostvariće nove mogućnosti za istraživanja u oblasti ishrane, voda i životne okoline, kao i za proizvodnju, skladištenje i štednju energije. Sami nanoproizvodi dolaziće iz industrije koja intenzivno koristi znanje, a ne resurse.

Zadaci nanotehnologija u narednom periodu su:

- generisanje novih znanja u oblasti dimenziono i površinski zavisnih fenomena,
- kontrola osobina materijala na nanoskali za nove primene,
- studija nanomotora, nanomašina i nanosistema,
- osvajanje i izrada alata za karakterizaciju i manipulaciju na nanodimenzijama,
- proučavanje uticaja na zdravlje ljudi i životnu sredinu,
- uspostavljanje metrologije, nomenklature i standarda,
- integracija i konvergencija: nano-bio-info-kogno, (nano-bio-informacionih i kognitivnih tehnologija).

Da bismo ustanovili sadašnje međusobne odnose između različitih oblasti istraživanja u nanotehnologijama, mi ćemo ovde prikazati procentualna ulaganja planirana za 2006. god. u SAD [49]. Pored toga, prikazaćemo i kratak opis sadržaja predviđenih istraživanja.

4.1 Fundamentalni fenomeni i procesi u nanorazmerama

(22,2%)

Otkrivanje i razvoj osnovnih znanja koja su povezana sa novim fenomenima u fizičkim, biološkim i inženjerskim naukama koji se dešavaju na nanorazmerama. Ovladavanje naučnim i inženjerskim principima povezanim sa nanostrukturama, procesima i mehanizmima.

4.2 Nanomaterijali

(21,6%),

Istraživanje radi otkrivanja novih nanodimenzionih i nanostrukturnih materijala i potpuno razumevanje njihovih osobina (zavisnost od razmera uključujući međupovršinske interakcije). R&D koji dovode do mogućnosti da se dizajniraju i sintetizuju na kontrolisan način materijali sa željenim osobinama.

4.3 Naprave i sistemi u nanorazmerama

(23,1%),

R&D koji primenjuju principe nanonauka i inženjeringa da bi se kreirale nove, ili poboljšale postojeće, naprave i sistemi. Uključuje ugradnju nanomaterijala da bi se poboljšale performanse ili postigle nove funkcije. Da bi se zadovoljila definicija nanotehnologija sama nauka i procesi moraju biti vezani za nanodimenzije, dok sami sistemi i naprave ne moraju biti ograničeni nanodimenzijama.

4.4 Instrumentaciona istraživanja, metrologija i standardi za nanotehnologije

(6,7%),

R&D su povezana sa alatima neophodnim za napredna istraživanja i komercijalizaciju nanotehnologija, uključujući sledeću generaciju instrumentacije za karakterizaciju, merenje, sintezu i dizajn materijala, struktura, naprava i sistema. Takođe uključuje R&D i druge aktivnosti povezane sa razvojem standarda, obuhvatajući nomenklaturu, materijale, karakterizaciju, testiranje i izradu.

4.5 Nanoproizvodnja

(4,5%),

R&D povezana sa različitim organizacionim nivoima, pouzdana i po ceni povoljna proizvodnja nanomaterijala, struktura, naprava i sistema. Uključuje R&D i integraciju procesa ultraminijaturizacije postupkom odozgo nadole i procesa odozdo nagore ili procesa samoasbliranja.

4.6 Nabavka opreme i najvažnije istraživačke instalacije

(14%)

Izgradnja korisničkih kapaciteta, kupovina bazične opreme i druge aktivnosti koje razvijaju i povećavaju nacionalnu naučnu infrastrukturu za rad u oblasti nanonauka i inženjeringa.

4.7 Društvena dimenzija (zdravlje, zaštita, edukacija)

(7,8%).

Različite istraživačke i druge aktivnosti posvećene širokom uticaju nanotehnologija na društvo, uključujući dobre strane i rizike kao što su:

- istraživanja usmerena na uticaj nanotehnologija na životnu sredinu, zdravlje, bezbednost, opasnosti i rizici,
- obrazovanje,
- istraživanja etičkih, pravnih i socijalnih uticaja nanotehnologija.

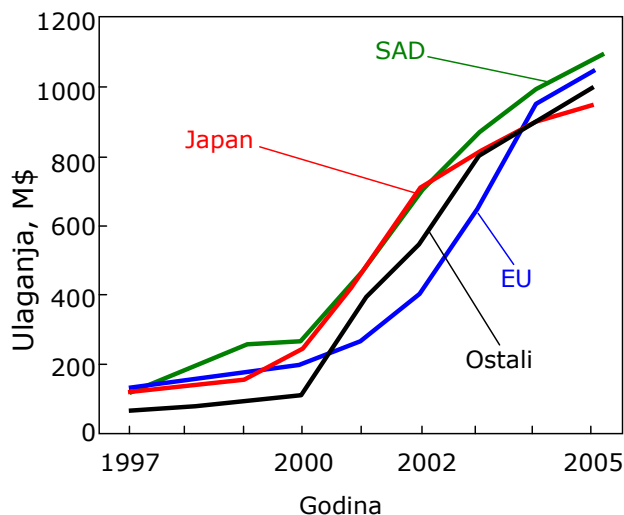
5. ULAGANJA

Danas je nesporno da najveća državna ulaganja u nanotehnologije dolaze od najrazvijenijih zemalja. Na sl. 4 dat je prikaz ulaganja SAD, EU, Japana i ostalih u poslednjih nekoliko godina.

Kao što se vidi sve ove četiri grupacije, uzete pojedinačno, sada ulažu sredstva od po približno milijardu dolara. Što se tiče privatnih ulaganja, ona su veća u SAD i Japanu u odnosu na EU i nešto su veća od državnih ulaganja.

O značaju nanotehnologija i ulaganjima može se suditi i po predlogu budžeta EU za okvirni program FP7 [5], koji je prikazan u tabeli 1.

Ukoliko se detaljnije pogleda sam predlog programa FP7 onda se može videti da i u okviru drugih predloženih programskih celina značajan deo pripada nanotehnologijama.



Sl. 4. Ulaganja u istraživanje i razvoj u nanotehnologijama po godinama

Tabela 1. Predlog budžeta FP7 EU (M€)

Zdravlje	8317
Hrana, poljoprivreda i biotehnologije	2455
Informacione i komunikacione tehnologije	12670
Nanonauke, nanotehnologije, materijali i nove proizvodne tehnologije	4832
Energija	2931
Životna okolina (uklj. promene klime)	2535
Transport (uklj. vazduhoplovstvo)	5940
Društveno-ekonomske nauke	792
Bezbednost i istraživanje svemira	3960

Interesantno je navesti i godišnja ulaganja u € po stanovniku [42]: Japan 6,2; Irska 5,6; USA 3,6; Nemačka i Francuska 3; (EU-15) 2,9; (EU-24) 2,4 itd.

Ne ulazeći u detalje ocenjivanja, SAD prednjače u ukupnim rezultatima (broj objavljenih radova, broj patenata, broj nanoproizvoda), ali razlika je vrlo mala u odnosu na EU, a i Japan je takođe vrlo blizu i u nekim oblastima kao što je nanoelektronika izgleda i da prednjači. Tu su Tajvan, Koreja i Indija. Veliki prodor u ovoj oblasti čine Kinezi, angažujući veliki broj stručnjaka i školujući za ovaj program još mnogo veći broj.

6. NEKE KARAKTERISTIČNE PRIMENE

6.1 Atomska mikroskopija

Već od ranije je bilo poznato da tunelska struja između dva provodnika zavisi od njihovog rastojanja S kao

$$j = \frac{e^2}{\hbar} \frac{k_0}{4\pi^2 S} V e^{-2k_0 S} \quad (1)$$

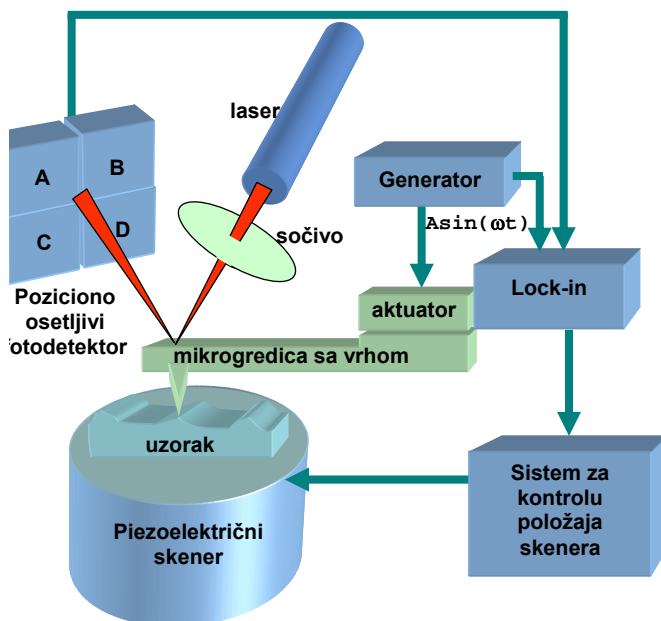
k_0 - efektivna dužina slabljenja talasne funkcije, V – priključen napon, $\frac{e^2}{\hbar} = 2,44 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1}$, kvantna Holove provodnost. k_0 je dato izrazom:

$$2k_0 \left(\text{\AA} \right) = 1,025 \sqrt{\Phi(eV)} \quad (2)$$

gde je Φ efektivna veličina potencijalne barijere. Iz 1 i 2 proizilazi da će se za $\Phi = 4,5 eV$ tunelska struja promeniti za skoro red veličine pri promeni rastojanja tunelovanja od 1 Å. Ukoliko postoje stabilne igle sa jednim atomom na vrhu (postojanje ovakvih igala dokazano je 1951.) tada se ovim metodom, pri skeniranju igle iznad površine može dobiti atomska rezolucija.



Sl. 5. Gerd Binnig, izumitelj mikroskopa sa skanirajućom sondom (SPM) i mikroskopa atomskih sila (AFM)



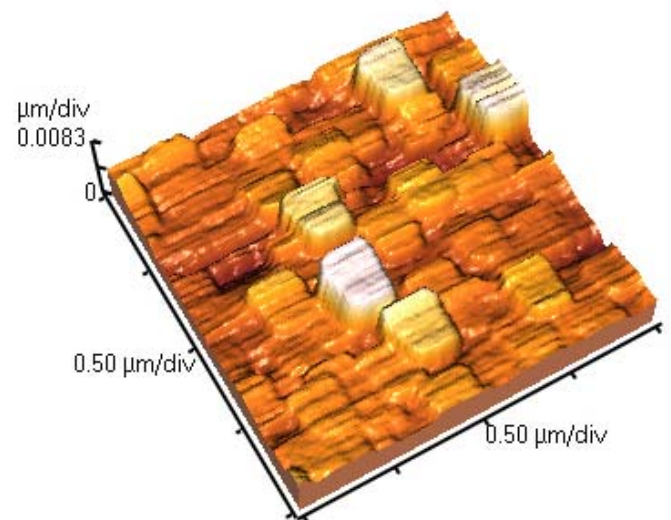
Sl. 6. Blok šema Atomic Force mikroskopa.

Sam princip rada AFM-a [48] polazi od činjenice da su veze između atoma kod čvrstih materijala jake i da je energija veze reda 10 eV. Kod materijala kod kojih su atomi povezani slabim Van der Waals-ovim vezama ova energija je samo oko 10 meV. Ako uzmemo da se atomi nalaze na rastojanju od približno 0,16 Å nalazimo da energija veze od 1 eV odgovara sili od oko $10^{-8} N$. Dakle interakcione sile kod različitih materijala se nalaze u opsegu od $10^{-7} N$ za jonske veze do $10^{-11} N$ za Van der Waalsove veze. Najmanje sile površinske rekonstrukcije su reda $10^{-12} N$.

Binnig (sl. 5) i saradnici, razmatrajući metode detekcije ovih sila razmatrali su mogućnost detekcije pomoću male poluge učvršćene na jednom kraju, tzv. mikrogređice, na čijoj se drugoj strani nalazila vrlo oštra igla (Sl. 6). Za male pomeraje, sila koja deluje na vrhu gređice data je sa $F = k \cdot x$ gde je k konstanta krutosti a x defleksija. Pošto se kao merna veličina koristi pomeraj gređice, ovo znači da bi za merenje male sile bilo potrebno da konstanta krutosti bude što je moguće manja. Sa druge strane, da bi se minimizirala osetljivost celog sistema i vibracioni šum koji je blizu 100 Hz, potrebno je da gređica ima visoku rezonantnu frekvenciju. Rezonantna frekvencija, f_o , ovakvog sistema određena je sa

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

gde je m , efektivna masa mikrogređice. Dakle da bi se dobile "mekane" gređice i odgovarajuće frekvencije, potrebno je smanjiti njihovu masu, odnosno dimenzije. U originalnom instrumentu Binniga i saradnika merenje pomeraja obavljeno je korišćenjem tunelskog efekta, što je omogućivalo da se izmere pomeraji od 10^{-4} angstroma. Dakle, sile koje su mogle biti merene bile su reda $10^{-16} N$, a još manje $10^{-18} N$ ako se gređica sa Q faktorom od 100 pobuđuje na rezonantnoj frekvenciji. ($k = 10^{-2} N/m$).



Sl. 7. Snimak površine spaterovanog Si načinjen na AFM.

Prvi AFM radio je u tzv. kontaktnom modu. U ovom modu vrh igle, montiran na kraju mikrogredice, skanira površinu uzorka po redovima.

Defleksija mikrogredice usled interakcije vrh igle – površine omogućuje generisanje 3D prikaza površine. Uzorci mogu da budu analizirani u vazduhu, tečnosti i vakuumu. Zanimljivo je primetiti da merenja u tečnosti ili vakuumu omogućuju bolju rezoluciju u odnosu na onu koja se postižu na vazduhu. To je zbog toga što u prve dve sredine ne postoje kapilarne sile.

Biološki uzorci se teško analiziraju u kontaktnom modu, pošto su oni mekani i slabo vezani za podlogu.

6.2 Energetska kriza

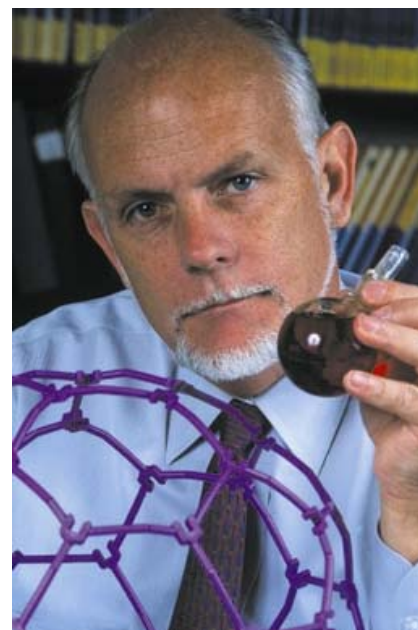
Prema ranije pomenutom nobelovcu R. Smoliju [39] [55], najvažnijih deset problema čovečanstva u narednih 50 god. su: energija, voda, hrana, sredina, siromaštvo, terorizam i ratovi, bolesti, obrazovanje, demokratija i naseljenost.

U ovom trenutku čovečanstvo ima oko 6,5 milijardi stanovnika, a očekuje se da će 2050 god. čovečanstvo imati oko 10 milijardi ljudi. Potrošnja energije u 2004 god. iznosila je približno 14,5 TW dok bi ona 2050 god. iznosila između 30 i 60 TW.

Današnja struktura energetske izvora je sledeća; najveći deo energije dobija se iz nafte (32%), uglja i gasa (45%), fisijom (6%), iz biomase (10%), hidroelektrana (5%), ostali izvori (2%). Pri ovom na solarnu energiju, vetar i geotermalnu energiju otpada samo oko (0,5%). Detaljne analize pokazuju da su današnji najvažniji energetski izvori ograničeni, što znači da će čovečanstvo ući u ozbiljnu energetsku krizu ukoliko ne nađe nove izvore energije. Polazeći od činjenice da najveći fuzioni izvor u našem planetarnom sistemu – Sunce – kontinualno šalje na Zemlju snagu od oko 165.000 TW, R. Smoli predviđa da će 2050. god. struktura izvora energije biti potpuno promenjena, tako da će udeo solarne energije, energije vetra i geotermalne energije porasti na 50%. Nafta, gas i ugalj imaju udeo oko 20%, fisija/fuzija 15%, dok će ostali energetski izvori biti slični današnjima.

Analiza R. Smolija pokazuje da bi nanotehnologije mogle da pomognu u rešavanju energetske krize na sledeće načine:

- ✦ smanjenje cene fotonaponskih solarnih ćelija 10x
- ✦ fotokatalitička redukcija CO₂ u metanol
- ✦ Baterije, akumulatori, superkondenzatori – poboljšanje kapaciteta 10-100 puta
- ✦ energetski kablovi zasnovani na superprovodnicima ili kvantnim provodnicima
- ✦ Skladištenje H₂ reverzibilnom hemisorpcijom ili pravljenje lakših i izdržljivijih rezervoara, korišćenjem ugljeničnih nanotuba i fularena
- ✦ Gorivni spregovi/ćelije – cena bi mogla pasti 10-100 puta + niskotemperaturno startovanje + reverzibilnost.



Sl. 8. R. Smoli (R. Smalley), s R. F. Kerlom Juniorom (R. F. Curl Jr) i H. V. Krotom (H. W. Kroto) izumitelj fulerena.

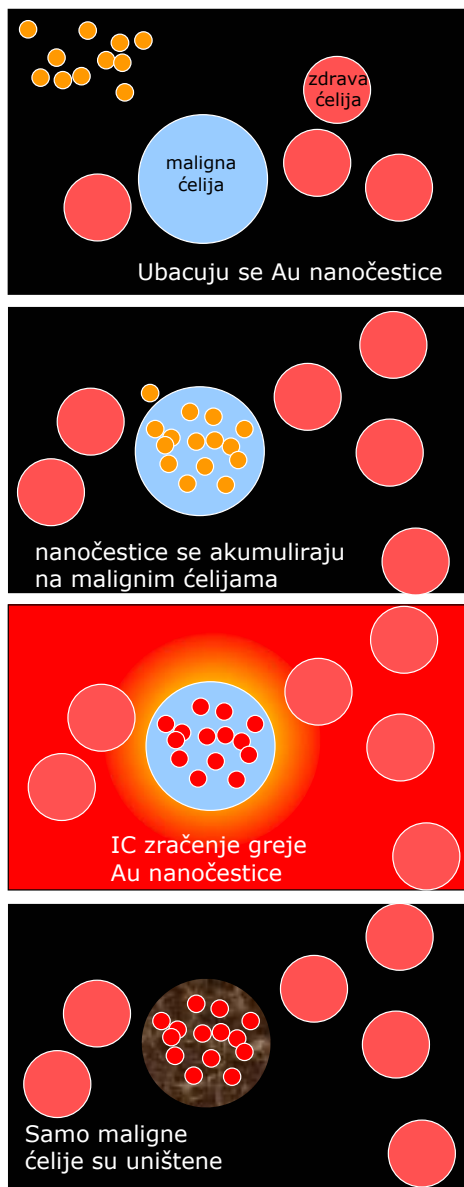
6.3 Medicinske primene

Kao što je u više navrata rečeno, očekuje se da nanotehnologije odigraju značajnu ulogu u lečenju ljudi. Navodimo jedan od primera uzet iz [56].

Bez obzira na veliki napredak u lečenju raka, svakog minuta jedan Amerikanac umire od ove bolesti, a slična statistika važi i za druge zemlje. Korišćenjem nanotehnologija može se doći do novih tretmana za različite vrste kancera sa minimalnim propratnim efektima. Jedan od prilaza koji mnogo obećava je usmeren na uništenje malignih ćelija upotrebom lokalizovanog grejanja. Tretmani koji su prethodili upotrebljavali su fokusiranu ultrazvučnu energiju, mikrotalase i lasersku svetlost. Mana ovih tretmana bila je da oni nisu mogli da razlikuju tumor i okolno zdravo tkivo.

Istraživači sa Rice Univerziteta izvršili su eksperimente u kojima su tretirali miševе kod kojih je indukovан kancer nanočesticama koje omogućuju selektivnu termalnu terapiju. Nanočestice u obliku zlatnih ljuski sa prečnikom od oko 150 nm injektovane su u krvotok ovih miševa. Ova veličina nanoljuski prodire u tumore, a ne prodire u zdravo tkivo. Nanoljuske su tako dizajnirane da apsorbuju infracrveno zračenje dok zdravo tkivo ovo zračenje ne apsorbuje. Nanoljuske se zagrevaju kada apsorbuju infracrvenu svetlost, uništavajući susedne ćelije raka.

Devedeset dana pošto su miševi sa kancerom bili podvrgnuti ovom tretmanu fototermalne terapije konstatovano je da su zdravi i da nemaju tumor, dok su netretirani miševi posle 12 dana morali biti eutanazirani zbog naglog rasta tumora. Pomenuti istraživači sada rade eksperimente sa krupnijim životinjama dok će naredni korak biti klinička ispitivanja.



Sl. 9. Uništavanje malignih ćelija pomoću nanočestica.

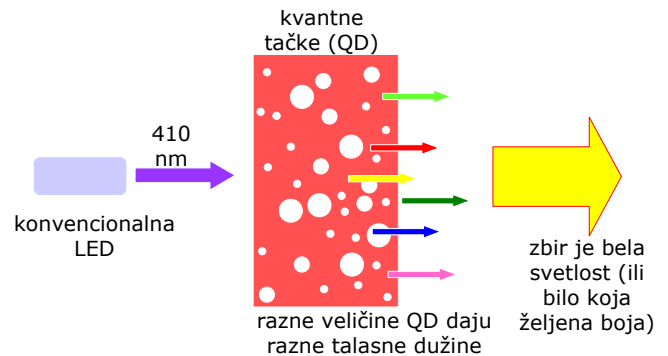
6.4 Svetlosni izvori visoke efikasnosti

Kao sledeći primer razmotrićemo kako nanotehnologije mogu da povećaju konverziju električne energije u svetlosnu [56]. Od ukupne energije koju razvijeni svet koristi jedna trećina je električna energija, a 1/5 ove energije se troši na osvetljavanje. Konverzija električne energije u svetlosnu je niska. Tako lampe s usijanim vlaknom konvertuju samo 5% električne energije u svetlosnu, ostalo se pretvara u toplotu. Fluorescentne lampe su nešto bolje, ali i one imaju koeficijent konverzije oko 25%. Radi poređenja, električni motori mogu da dostignu 95% efikasnosti. To znači da i ovde postoji značajan prostor za povećanje konverzione efikasnosti.

Poluprovodničke diode koje emituju svetlost (LED), pretvaraju električnu energiju u svetlosnu mnogo efikasnije, konverzioni faktor je oko 50% , ali je svetlost obojena i nije pogodna za osvetljenje. Korišćenje standardne LED sa talasnom dužinom bliskom ultravioletnoj oblasti (410 nm) koja osvetljava skup poluprovodničkih nanočestica "kvantnih tačaka" može se dobiti bela svetlost, jer kvantne tačke

različitih dimenzija emituju svetlost različitih boja. Dakle, mešajući kvantne tačke različitih dimenzija može se dobiti naprava koja daje svetlost proizvoljne boje, uključujući i belu.

Ako bi se postojeći svetlosni izvori zamenili ovakvim LED-ovima, potrošnja električne energije za osvetljavanje bi se smanjila za pola, a to je npr. za SAD energija koju proizvode 50 nuklearnih centrala. (PCAST report, maj 2005.)



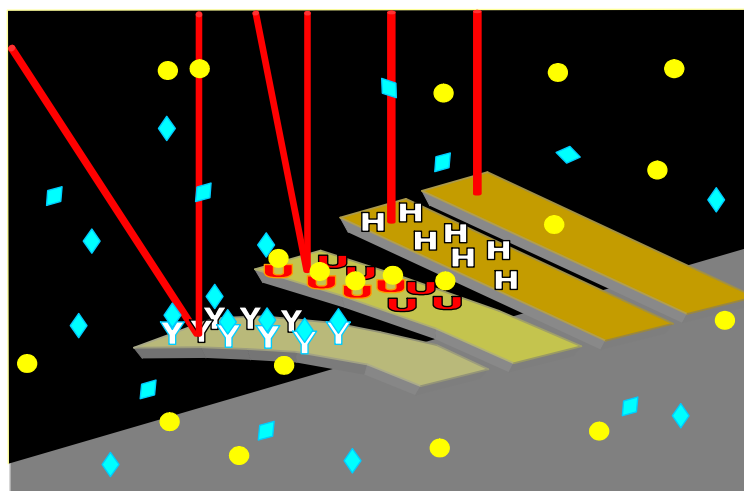
Sl. 10. Svetlosni izvor visoke efikasnosti

Kao poslednje primere primene nanotehnologija izabrali smo oblast u kojoj se, minijaturene mikro- nanogredice, slične onima koje se koriste kod AFM-a, mogu upotrebiti kao platforma nove generacije minijaturnih senzora, kao i korišćenje fonskih kristala u optoelektronici. Ovaj naš izbor je, pored značaja ove problematike, uslovljen i činjenicom da i autor ovog rada sa svojim saradnicima radi u ovoj oblasti.

6.5 Mikro- i nanogredice za senzorske primene

Osnovna komponenta mikro i nanoelektromehaničkih senzora koji se koriste za detekciju i merenje brojnih fizičkih, hemijskih i bioloških parametara je minijaturna gredica, izrađena najčešće od silicijuma, silicijum-karbida ili galijum-arsenida. Prva primena ovih gredica datira iz 1986. god [48]., kada su, kao što smo ranije naveli, Binning i Quate patentirali AFM (Atomic Force Microscope), uređaj, koji na osnovu merenja veoma malih (međuatomskih i međumolekulskih) sila, omogućuje dobijanje 3D snimka visoke rezolucije površine nekog uzorka i određivanje različitih svojstava te površine (strukture, hrapavosti, elastičnosti, raspodele naelektrisanja, potencijala, magnetskih svojstava).

Male dimenzije i masa AFM gredice i mogućnost detektovanja njenih veoma malih pomeraja, ukazali su na veliki potencijal ove jednostavne mikromehaničke komponente za primenu u visokoosetljivim senzorima. Danas, oblast MEMS i NEMS senzora sa gredicom pobuđuje veliko interesovanje, jer ih odlikuje niz povoljnih osobina: visoka osetljivost, brz odziv, minijaturne dimenzije, prenosivost, merenje in situ u realnom vremenu, niska cena izrade, mogućnost masovne proizvodnje. Oni omogućuju merenje sile, mase, naprezanja površine, koncentracije određenog gasa, temperature, vlage, infracrvenog i ultraljubičastog zračenja. Mogu da rade u vazduhu, vakuumu ili tečnostima, pa su pogodni i za izučavanje bioloških struktura (komponenta ćelije i DNK) i biohemijskih i fizioloških procesa u fiziološkim uslovima. Pošto se koriste i za detekciju prisustva i koncentracije određenih (štetnih) supstanci u vazduhu i vodi, imaju i ulogu u ekologiji i zaštiti životne sredine.



Slika 11. Princip korišćenja adsorpcije na mikrogredicama za istovremenu selektivnu detekciju većeg broja različitih supstanci

Princip rada AFM-a i senzora sa gredicom [50] zasniva se na pretvaranju određenog spoljašnjeg uticaja (međumolekulske ili međuatomske sile, adsorbovane mase, promene temperature i dr.) u pomeraj (savijanje) gredice, ili u promenu parametara oscilovanja (amplitude, frekvencije, faze) gredice koja je pobuđena da osciluje. Iz toga su proistekla dva osnovna režima rada AFM-a i senzora sa gredicom: statički, u kojem se detektuje pomeraj, i dinamički, u kojem se detektuju amplituda, frekvencija ili faza oscilovanja gredice.

U povoljne karakteristike MEMS i NEMS senzora ubraja se i mogućnost korišćenja niza gredica za detekciju više različitih supstanci istovremeno (Sl. 11). Svaka gredica (osim referentne) ima funkcionalizovanu površinu, pa se na njoj adsorbuju samo čestice određene vrste. Na osnovu veličine savijanja svake gredice u odnosu na referentnu, određuje se u kojoj meri (količini, koncentraciji) je prisutna određena supstanca.

Gredice se koriste i kao komponente MEMS i NEMS oscilatora. Objedinjavanjem silicijumske mikroelektronike (ili: tehnologije integrisanih kola) i tehnologije mikromašinstva, MEMS i NEMS omogućuju integraciju kompletnih sistema na čipu. Upotreba MEMS/NEMS oscilatora sa gredicom, koji su integrisani sa aktivnom elektronikom na istom čipu, umesto kvarnih oscilatora koji su glomazni i predstavljaju posebne komponente na štampanoj ploči, ima niz prednosti: omogućuje minijaturizaciju, nižu cenu i veću pouzdanost uređaja.

Razvoj ove tehnologije vodi ka sve većoj minijaturizaciji, ka prelasku sa mikrometarskih na nanometarske dimenzije. Gredice manjih dimenzija povećavaju osetljivost senzora i omogućuju detekciju sve manjih i manjih veličina. Takođe, gredice manjih dimenzija imaju veću sopstvenu rezonantnu učestanost. Zato se, pored mikrogredica, sve više govori o nanogredicama. Ekstremno visoke rezonantne frekvencije, velike vrednosti Q-faktora ($Q \sim 10^3 - 10^5$), male konstante krutosti i mala masa minijaturnih gredica, čine ih izuzetno osetljivim komponentama za merenje mase. Na primer, naučnici sa univerziteta u Kornelu (Curnell, USA) nedavno su izmerili masu reda 10^{-18} g.

Minimalna vrednost neke veličine koju je moguće izmeriti određena je ukupnim šumom u sistemu. Takođe, i

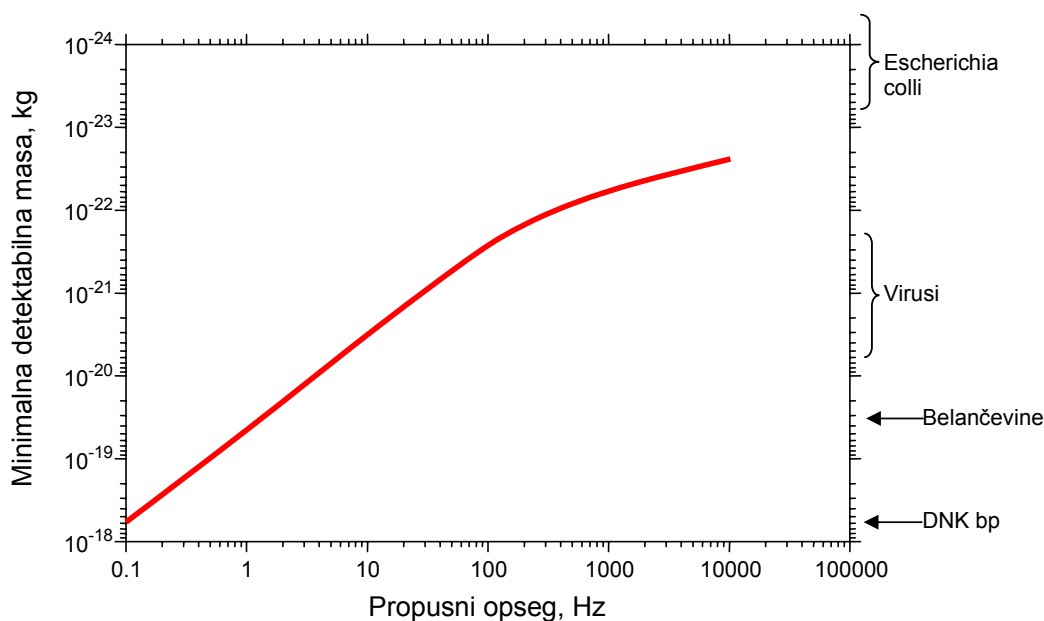
tačnost i stabilnost učestanosti oscilatora određena je šumom.

U našim dosadašnjim istraživanjima [51]-[53], bavili smo se teorijskom analizom mehanizama šuma karakterističnih za strukture mikro- i nanometarskih dimenzija, kao i projektovanjem i izradom mikrogredice, koju ćemo koristiti za realizaciju senzora i eksperimentalnu proveru teorijskih rezultata. Analiza šuma nam omogućuje određivanje graničnih performansi, dakle, minimalnog detektabilnog signala i osetljivosti MEMS i NEMS senzora sa gredicom, i određivanje tačnosti frekvencije MEMS i NEMS oscilatora. Takođe, treba da posluži i za izbor optimalnih parametara pri projektovanju MEMS i NEMS senzora i oscilatora, i određivanje optimalnih radnih uslova.

Posebno smo se bavili hemijskim sensorima sa gredicom koji rade u dinamičkom režimu (gredica osciluje), kod kojih se detektovanjem i merenjem mase adsorbovane na površini gredice, određuje prisustvo i koncentracija nekog gasa u okolini gredice. Na sličnom principu rade i biološki senzori. Druga grupa MEMS/NEMS senzora kojima smo se do sada bavili, su IR termalni detektori sa bimaterijalnom gredicom.

U analizi šuma, potrebno je razmotriti pojave i procese koji su u makrosvetu zanemarljivi, a presudno utiču na performanse MEMS i NEMS uređaja. Takav je, na primer, proces adsorpcije i desorpcije čestica okolnog gasa po površini gredice, koji dovodi do promene mase sistema koji osciluje (gredica+adsorbovane čestice na njoj), a time i do promene rezonantne učestanosti koju merimo. Slučajna priroda procesa adsorpcije i desorpcije rezultuje u fluktuaciji mase oscilujućeg sistema i njegove frekvencije, tj. uzrok je adsorpciono-desorpcionog šuma. Ostale komponente šuma koje smo analizirali su termomehanički šum i šum usled temperaturskih fluktuacija. Kod senzora sa piezootpornom detekcijom (u gredicu je ugrađen piezootpornik) analizirali smo i Džonsonov i $1/f$ šum.

Naša izračunavanja minimalne detektabilne mase pokazuju da se pomoću rezonantnih senzora mogu detektovati mase reda 10^{-21} g, što je za dva reda veličine manje od mase molekula proteina ili približno jednako masi jednog baznog para DNA (Sl. 12).



Slika 12. Minimalna detektabilna masa

6.6 Elektromagnetski metamaterijali

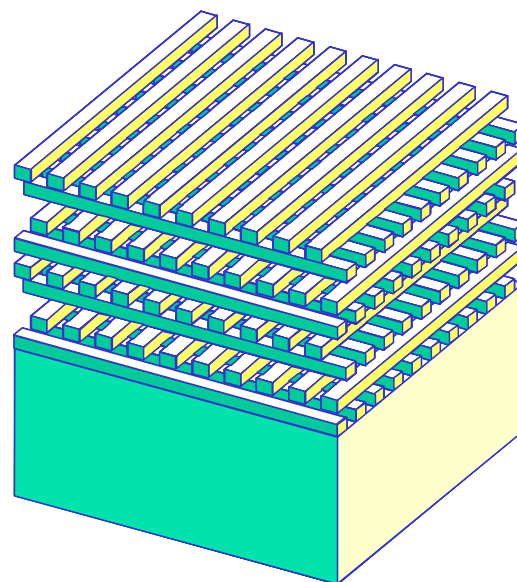
Jedna od bitnijih primena nanotehnologija u današnje vreme je izrada veštačkih materijala s elektromagnetskim svojstvima kakva se ne sreću u prirodi, odnosno proizvodnja nanostruktura za nanooptiku i nanofotoniku. Svi ovi materijali uslovno se mogu klasifikovati kao metamaterijali, tj. materijali s osobinama koje prevazilaze prirodne.

Nanotehnologije se koriste za formiranje struktura od dielektrika i metala uređenih na mezoskopskom i podtalasnom nivou, a za posledicu ima materijale s osobinama do sada neviđenim u prirodi, a često čak u potpunosti kontraintuitivnim.

Istorijski, jedan od prvih primera ovakvih materijala su fotonski kristali. To su materijali čija periodičnost na mezoskopskom nivou dovodi do pojavljivanja fotonskog energetskog procepa, odnosno oblasti energija u kojoj se ovakav materijal ponaša kao savršeno ogledalo, bez obzira na smer prostiranja svetlosti. Fotonski kristali se sa svetlošću ponašaju vrlo slično kao poluprovodnici s nosiocima naelektrisanja. Zbog toga je između ostalog predložena njihova upotreba za čisto optičke aktivne komponente, tranzistore i sl, koje bi mogle dovesti do revolucije u npr. računarskoj industriji.

Fotonski kristali omogućili su dobijanje optičkih komponenti, npr. talasovoda i integrisanih optičkih komponenti, s dimenzijama nekoliko redova veličine manjim od konvencionalnih, lasera s dramatično smanjenom strujom praga itd.

Druga klasa metamaterijala su strukture s negativnim indeksom prelamanja. Ovi materijali ponašaju se protivno intuiciji, npr. Doplerov pomak u njima je plav za udaljavanje i crven za približavanje, lome svetlost na istu stranu s koje je došla upadna itd. Najbitnija primena ovih materijala jesu tzv. savršena sočiva, optički elementi koji nisu ograničeni difrakcionim limitom i koji već danas (u vidu tzv. "supersočiva") omogućuju litografiju nanometarskih rezolucija.



Sl. 13. 3D Fotonski kristal tipa 'Lincoln log'.

Među metamaterijale spadaju još matrice podtalasnih rupa s mnogo većom transmisijom nego što to predviđa klasična teorija, koje su već predložene za nelinearne i aktivne komponente, kao i metalna optika u kojoj višestruki metalni slojevi propuštaju svetlost iako bi trebalo da su potpuno neprozirni i koji se primenjuju za filtre karakteristika superiornih u odnosu na klasične.

7. NANOTEHNOLOGIJE KOD NAS

Prvi radovi, koliko je nama poznato, iz oblasti kvantovanja u površinskom sloju Si-SiO₂, kod nas su se pojavili 1976. god [57]. Efekti kvantovanja bili su izraženi pri debljinama SiO₂ slojeva od nekoliko destina angstroma.

Danas Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije finansira 15 projekata sa problematikom iz

oblasti nanotehnologija: devet projekata iz fizike, četiri iz hemije i dva iz tehnološkog razvoja. Ukupna sredstva po godini istraživanja su oko € 1.200.000.

Tematika ovih projekata je sledeća:

- ✦ **Fizika** – Fizika niskodimenzionih struktura, električne, optičke i mehaničke osobine nanostrukture i nanotuba, nanočestice, procesi u plazmi i nanonaprave;
- ✦ **Hemija** – Kataliza, elektrokataliza na nanomaterijalima, magnetne nanostrukture;
- ✦ **Tehnološki razvoj** – MEMS i NEMS (mikro- i nanoelektromehanički sistemi), nanosenzori, MOEMS i NOEMS (mikro- i nano optoelektromehanički sistemi).

Kao što je u uvodu rečeno, sve zemlje sa organizovanom naukom imaju nacionalne strategije, a nanonauke i nanotehnologije su "dugoročni cilj istraživača svih nacija u 21 veku" [31]. Većina zemalja iz okruženja ima nacionalne strategije iz nanotehnologija – npr. Rumunija, Bugarska. Zato je neophodno sledeće:

- ✦ Izraditi nacionalnu strategiju o nanonaukama i nanotehnologiji usaglašenu sa strategijom EU,
- ✦ Formirati nacionalne centre i nacionalnu mrežu za nanonauke i nanotehnologije i povezati ih sa odgovarajućim centrima u Svetu, a naročito u EU,
- ✦ Izraditi plan koordiniranog i usaglašenog opremanja centara i mreže,
- ✦ Izraditi program obrazovanja usaglašen sa programom EU.

Na osnovu rečenog, smatram da bi kod nas u najskorije vreme trebalo uraditi sledeće:

- ✦ Identifikovati tekuće projekte Ministarstva sa temama koji se odnose na nanonauke i nanotehnologije;
- ✦ napraviti bazu podataka za pojedince i grupe istraživača čije su oblasti istraživanja vezane za nanonauke i nanotehnologije;
- ✦ objediniti identifikovane projekte i formirati koordinaciono telo za ove projekte;
- ✦ definisati organizacione mere podrške projektima iz ove oblasti.

8. NEKOLIKO REČI O OBRAZOVANJU

Nedavno je EU u Briselu organizovala posebno savetovanje pod nazivom „Workshop on research training in nanoscience and nanotechnologies – current status and future needs” [31]. Osnovni zadatak ovog savetovanja bio je da se sagleda kakvo obrazovanje treba da imaju naučnici i inženjeri da bi mogli uspešno da se bave nanotehnologijama i da doprinose afirmaciji kompletne oblasti. Sagledavajući kompleksnost i interdisciplinarnost nanotehnologija savetovanje je donelo sledeće preporuke:

- Pokrenuti inicijative za uvođenje nanonauka u školske programe.
- Pomagati izradu pedagoških materijala na maternjem jeziku.
- Širiti najbolja iskustva i promovisati magistarske i doktorske studije na ujedinjenoj osnovi za čitavu EU, sa širokim profilom koji uključuje etičko, društveno i popularizaciono osposobljavanje.
- Podržavati pokretljivost, kako geografsku, tako i između disciplina i oblasti.

Kao primer sadržaja postdiplomskih studija iz oblasti nanonauka u Tabeli 2 prikazujemo podelu predmeta kakva se koristi na Univerzitetu u Lincu.

Tabela 2. Glavne oblasti proučavanja u nanonaukama

<p>NANOMATERIJALI</p> <ul style="list-style-type: none"> • poluprovodničke nanostrukture • biomolekuli • nanostrukturirane površine • tanki filmovi • funkcionalne keramike • polimerne nanostrukture 	<p>NANOANALITIKA I NANOSIMULACIJA</p> <ul style="list-style-type: none"> • SPM mikroskopija • elektronska mikroskopija • difrakcione tehnike • optička spektroskopija • elektronska svojstva • razvoj modela i simulacija
<p>NANOSTRUKTURIRANJE</p> <ul style="list-style-type: none"> • epitaksija • litografija e-snopom • lasersko formiranje • manipulacije skanirajućom sondom • RIE • sinteza nanokristala • samoorganizacija 	<p>NANO-APLIKACIJE</p> <ul style="list-style-type: none"> • poluprovodničke naprave • biočipovi • organska elektronika • visokotemperaturni superprovodnici • nanofiltracija • senzori • kataliza

9. ZAKLJUČAK

Autoru ovoga rada sasvim je jasno da je predstavljanje svih prirodnih i inženjerskih nauka, kada se one bave živom i neživom materijom na nivou nanometra, vrlo prentenciozan zadatak, koji je teško ispuniti. Autor se ipak nada da je osnovna misija rada bar delimično ispunjena i da je pokazano da je razvijeni svet prihvatio nanotehnologije kao globalni zadatak istraživača svih nacija u 21. veku.

Imajući u vidu da su danas nanotehnologije još u početnoj fazi i da je dijapazon istraživačkih zadataka ogroman, nanotehnologije su idealna prilika za domaću nauku i tehnologije, jer u poređenju sa drugim oblastima zahtevaju (u velikom broju segmenata), mala ulaganja i vrlo specifično visokoobrazovan i sposoban kadar. Ovo tim pre što se u ovoj oblasti očekuju značajni i brojni rezultati za koje se smatra da će u potpunosti promeniti život u 21. veku. Radi se o jednoj od retkih prilika da domaća nauka i tehnologije uhvate korak sa svetskom naukom. Međutim, mi se u ovoj oblasti, zbog naše pasivnosti, opasno približavamo trenutku kada će biti vrlo teško, ako ne i prekasno za uključivanje u evropske inicijative o nanotehnologijama.

ZAHVALNOST

Autor se zahvaljuje svim saradnicima IHTM-Centra za mikroelektronske tehnologije i monokristale, a posebno dr Zoranu Jakšiću, dr Dani Vasiljević-Radović, dipl. inž. Ivani Jokić i Mr Olgi Jakšić za nesebičnu pomoć u tehničkoj obradi rada i brojnim diskusijama o "nano-kosmosu". Za sve je ipak bila presudna zajednička vera u budućnost nanotehnologija. Autor koristi priliku i da se zahvali prof. Milanu Damnjanoviću iz Nanolaba fakulteta fizike Beograd za slike fullerena.

NAPOMENA

Ovaj rad je delimično finansiralo Ministarstvo nauke i zaštite životne sredine Republike Srbije u okviru projekta TR-6101B.

LITERATURA

- [1] M. C. Roco, "National Nanotechnology Initiative", Overview, ASME Workshop, September 22, 2004. (<http://nano.asme.org/nationalnanoinitiative.pdf>)
- [2] M. C. Roco, "The US National Nanotechnology Initiative after 3 years (2001-2003)", Journal of Nanoparticle Research, **6** (1) (2004) 1-10. (<http://www.springerlink.com/media/3G267U4FLK0XXMCPFMEL/Contributions/X/1/7/6/X17616653571632H.pdf>)
- [3] "The National Nanotechnology Initiative at Five Years: Assessment and Recommendations of the National Nanotechnology Advisory Panel", Submitted by the President's Council of Advisors on Science and Technology, May 2005. (<http://www.nanostellar.com/Reports/NationalNanotechnologyInitiative.pdf>)
- [4] M. Schulenburg, "Nanotechnology: Innovation for Tomorrow's World", European Commission, May 2004. (http://www.europarl.eu.int/stoa/ta/nanotechnology/reports/nanotechnology_-_innovation_for_tomorrows_world.pdf)
- [5] "Proposal for the Council and European Parliament decisions on the 7th Framework Programme (EC and Euratom)", Commission of the European Communities, Brussels, April 2005, SEC(2005) 430. (http://europa.eu.int/eur-lex/lex/LexUriServ/site/en/com/2005/com2005_0119en01.pdf)
- [6] Towards a European Strategy for Nanotechnology, European Commission, Community Research, 2004. (http://europa.eu.int/comm/research/industrial_technologies/pdf/nanotechnology_communication_en.pdf)
- [7] A. Hett, Nanotechnology: Small Matter, Many Unknowns, Zurich, 10 May 2004. (http://europa.eu.int/comm/research/industrial_technologies/pdf/nanotechnology_communication_en.pdf)
- [8] Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties – Summary and Recommendations, Nanoscience and Nanotechnologies, July 2004, The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, London, England. (<http://www.nanotec.org.uk/report/summary.pdf>)
- [9] E. Michelson, Analyzing the European Approach to Nanotechnology, Occasional Paper on Nanotechnology, November 2004, Woodrow Wilson International Center for Scholars Foresight and Governance Project. (<http://www.environmentalfutures.org/Images/Nanotec1.pdf>)
- [10] National Nanotechnology Initiative: Research and Development Supporting Next Industrial Revolution - Supplement to the President's FY 2004 Budget, October 2003. (http://www.nano.gov/nmi04_budget_supplement.pdf)
- [11] National Nanotechnology Initiative- Strategic Plan: Developed by the Nanoscale Science, Engineering and Technology Subcommittee, Committee on Technology, National Science and Technology Council, December 2004. (http://www.nano.gov/NNI_Strategic_Plan_2004.pdf)
- [12] F. Salamanca-Buentello, D. L. Persad, E. B. Court, D. K. Martin, A. S. Daar, P. A. Singer, Nanotechnology and the Developing World, PLoS Medicine, **2** (5) e97 (2005) 383-386. (http://medicine.plosjournals.org/archive/1549-1676/2/5/pdf/10.1371_journal.pmed.0020097-L.pdf)
- [13] Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties, Report 29. July 2004. (<http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>)
- [14] L. Yong, Nanotechnology in China: Present and Future, King & Wood IP Bulletin, January 2005. (http://www.kingandwood.com/Bulletin/IP%20Bulletin/Issue%20Jan%202005/bulletin_2005_1_en_liyong.htm)
- [15] I. Malsch, M. Oud, "Outcome of the Open Consultation on the European Strategy for Nanotechnology", December 2004. (<http://www.nanoforum.org/dateien/temp/nanosurvey6.pdf?20122004094532>)
- [16] "Technology Platform Nanoelectronics Strategic Research Agenda- Executive Summary", ENIAC - European Nanoelectronics Initiative Advisory Council, Brussels, April 27, 2005. (ftp://ftp.cordis.lu/pub/ist/docs/eniac/sra_summary_en.pdf)
- [17] "National Nanotechnology Initiative", The Initiative and its Implementation Plan, National Science and Technology Council, Committee on Technology, Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology, July 2000, Washington. (<http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Implementation.Plan/nni.implementation.plan.pdf>)
- [18] Z. Đurić, "Comments on Nanotechnology Research & Training in West Balkan Countries", Research Training

- in *Nanosciences and Nanotechnologies: Current Status and Future Needs*, DG Research of the European Commission, 14th – 15th April, 2005, Brussels, Belgium.
ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/educationworkshop_session1_djuric_zuran.pdf
- [19] K. David, *Silicon Nanotechnology at Intel*, Intel Corporation, October 22, 2004.
<ftp://download.intel.com/research/silicon/Nano%20open%20house%20Ken%20David%20SS.pdf>
- [20] P. Gargini, “*Intel Nanotechnology Overview*”, Intel Nanotechnology Virtual Open House, October 22, 2004.
<ftp://download.intel.com/technology/silicon/Nano%20open%20house%20Paolo%20Gargini.pdf>
- [21] “*Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report, Vision for Nanotechnology R&D in the Next Decade*”, National Science and Technology Council, Committee on Technology Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology (IWGN), September 1999, Washington.
http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Research.Directions/IWGN_rd.pdf
- [22] R. Compano, Ed., “*Technology Roadmap for Nanoelectronics*”, Second Edition, European Commission, November 2000.
www.cordis.lu/ist/fetnid.htm
- [23] “*Nanotechnology - Innovation for Tomorrows World*”, European Communities, Luxembourg, 2004.
http://www.eurosfair.pr.fr/nmp/documents/pdf/Nanobrochure_en_2004.pdf
- [24] “*From Genomes to Atoms the Big Down Atomtech: Technologies, Converging at the Nano-scale, ETC Group*, January 2003.
<http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>
- [25] M. Bogedal, “*Nanotechnology in the Nordic Region, An Introduction*”, Report, Nanoforum publication, June 2003.
<http://www.nanoforum.org/index.php?folder=99999&modul=showpub&action=showcomplete&scid=110&code=cd3bbc2d7ca1bbdc055acf58609e6c24&userid=1333386&wb=111435&>
- [26] G. Bourianoff, “*Nanoenergetics, Nanomaterials, Nanodevices, Nanocomputing—Putting the pieces together*”, European Materials Research Society, May 26, 2004.
ftp://download.intel.com/research/silicon/Bourianoff_E-MRS_052604.pdf
- [27] R. Tommelini, “*Overview of European - Level Initiatives in Nanosciences and Nanotechnologies*”, Research Training in Nanosciences and Nanotechnologies: Current Status and Future Needs, DG Research of the European Commission, 14th – 15th April, 2005, Brussels, Belgium.
ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/educationworkshop_introductory_session_tomellini_renzo.pdf
- [28] P. Bird, “*Societal Dynamics of Nanoscale Science and Technology*”, 22 April, 2005.
<http://people.clarkson.edu/~birdps/thesis/p.Bird.Honors.thesis.status.3.3.pdf>
- [29] S. J. Wood, A. Geldart, R. A. L. Jones, “*The Social and Economic Challenges of Nanotechnology*”, *Technikfolgenabschätzung*, Nr. 3 / 4, 12, - November 2003, pp. 72-73.
<http://www.itas.fzk.de/tatup/033/woua03a.htm>
- [30] M. C. Roco, N. S. Bainbridge, Eds., “*Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*”, NSET Workshop Report, March 2001, Arlington, Virginia.
<http://www.wtec.org/loyola/nano/NSET.Societal.Implications/nanosi.pdf>
- [31] *Research Training in Nanosciences and Nanotechnologies: Current Status and Future Needs*, DG Research of the European Commission, 14th – 15th April, 2005, Brussels, Belgium.
<ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/>
- [32] Foresight Nanotech Institute – Short History of Nanotechnology
<http://www.foresight.org/nano/history.html>
- [33] R. Hiremane, “*From Moore’s Law to Intel Innovation—Prediction to Reality*”, *Technology@Intel Magazine*, April 2005, pp.1-9.
<http://www.intel.com/technology/magazine/silicon/moores-law-0405.pdf>
- [34] W. Luther, ed., “*Industrial Applications of Nanomaterials: Chances and Risks – Technological Analysis*”, Futures Technologies Division of VDI Technologiezentrum GmbH, Dusseldorf, Germany, 2004, 43.
<http://nano.uts.edu.au/nanohouse/nanomaterials%20risks.pdf>
- [35] R. Feynman, “*There’s plenty of room at the bottom: an invitation to enter new field of physics*” *m Engineering and Science*, 23, 5, pp. 22-36, 1960,
<http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [36] K. E. Drexler, “*Nanotechnology: From Feynman to Funding*”, *Bulletin of Science, Technology & Society*, Vol. 24, No. 1, 21-27 (2004).
<http://bst.sagepub.com/cgi/reprint/24/1/21>
- [37] O. Bueno, “*The Drexler-Smalley Debate on Nanotechnology: Incommensurability at Work?*”, *HYLE--International Journal for Philosophy of Chemistry*, Vol. 10, No.2 (2004), pp. 83-98.
<http://www.hyle.org/journal/issues/10-2/bueno.htm>
- [38] K. Goser, “*Nanoelectronics and Nanosystems: From Transistors to Molecular and Quantum Devices*”, Springer Verlag, Berlin. 2004, ISBN: 3-540-40443-0.
- [39] H. Singh Nalwa, Ed., “*Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*”, Vol. 1-10, Foreword by Richard Smalley, Nobel Prize Laureate, American Scientific Publishers, 2004.
- [40] C. Phoenix, K. E. Drexler, “*Safe Exponential Manufacturing*”, *Nanotechnology*, 15 (2004) 869-872.

http://ej.iop.org/links/q66/WP+k_ak1MnaG5EAFOJ7Vww/nano4_8_001.pdf

- [41] “*Nanotechnology Shaping the World Atom by Atom*”, National Science and Technology Council, Committee on Technology, The Interagency Working Group on Nanoscience, Engineering and Technology, September 1999, Washington, D.C.
(<http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Public.Brochure/IWGN.Nanotechnology.Brochure.pdf>)
- [42] “*Research Training in Nanosciences and Nanotechnologies: Current Status and Future Needs*”, DG Research of the European Commission, 14th – 15th April, 2005, Brussels, Belgium.
ftp://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/educationworkshop_introduutory_session_tomellini_rengo.pdf
- [43] “*The need for measurement and testing in nanotechnology*”, Compiled by the High Level Expert Group on Measurement and Testing Under the Fifth European Framework Programme for Research and Development, Danish Institute of Fundamental Metrology, November 2002.
(<http://www.npl.co.uk/euromet/length/docs/nano-initiative/dfm-report.pdf>)
- [44] *Emerging Issues in Nanoparticle Aerosol Science and Technology (NAST)*”, NSF Workshop Report, University of California, Los Angeles, June 27-28, 2003.
<http://www.nano.gov/html/res/NSFAerosolParteport.pdf>
- [45] M.C. Roco and W. S.Bainbridge, “*Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology, and Cognitive Science (NBIC)*”, Overview, June 2002, Arlington, Virginia.
http://wtec.org/ConvergingTechnologies/Report/NBIC_overview.pdf
- [46] S.E. Lyshevski, “*Nano- and Microelectromechanical Systems*”, CRC Press, 2000.
- [47] В. А. Биков, “*Прибори и методи сканирајуићеј зондовој микроскопији дјла иследованиа и модификацији поврхности*”, Дисертација, Москва, 2000.
- [48] G. Binning, C. F. Quate, Ch. Gerber, “Atomic Force Microscope”, *Phys. Rev. Lett.*, 56 (9) (1986) 930-933.
- [49] National nanotechnology initiative – supplement to the President’s 2006 budget, <http://www.nano.gov>
- [50] N. V. Lavrik, M. J. Sepeniak, P.G. Datskos, “Cantilever Transducers as a Platform for Chemical and Biological Sensors”, *Rev. Sci. Instrum.*, 75(7) (2004) 2229-2253.
- [51] Z. Đurić, O. Jakšić, D. Randelović, “Adsorption – Desorption Noise in Micromechanical Resonant Structure”, *Sensors and Actuators A*, 96 (2-3) (2002) 244-251.
- [52] Z. Đurić, “Mechanisms of Noise Sources in Microelectromechanical Systems”, *Microelectronics Reliability*, 40 (2000) 919-932.
- [53] Z. Đurić, I. Jokić, O. Jakšić, D. Vasiljević-Radović, “Adsorbed Mass and Resonant Frequency Fluctuations of a Microcantilever Caused by Adsorption and Desorption of Particles of Two Gases”, *Proc. 24th International Conference on Microelectronics MIEL 2004*, Vol 1, Niš, Serbia, May 16-19, (2004) 197-200.
- [54] G. E. Moore-a. «Cramming more component onto integrated circuits», *Electronics*, vol.38, No 8, april 19., 1965.
- [55] R. E. Smalley, “Our Energy Challenge”, 27th Illinois Junior Science & Humanities Symposium April 3, 2005
- [56] National nanotechnology initiative – strategic plan, 2004, <http://www.nano.gov>
- [57] Z. Đurić, Ž. Spasojević, D. Tjapkin, “Electron Grand State in the Semiconductor Inversion Layer and Low Frequency MIS Capacitance”, *Solid State Electronics*, 19 (1976) 931-937.

Abstract – Under nanotechnologies one usually assumes nanoscience, nanoengineering and technologies on nano-level. Bearing in mind their wide interdisciplinarity, i.e. the fact that nanotechnologies are interleaved with a number of disciplines (physics, chemistry, bioscience, etc.) it is difficult to formulate a general definition. Three definitions are given in this paper, two of these from U.S. sources and one from Europe. Since there is apparently a general agreement that nanotechnologies in future will permeate every facet of life, this defines education in the field as a task of essential importance. The papers presents the historical development of nanotechnologies starting from the famous Feynman's lecture "There's plenty of room at the bottom" in 1959 and proceeding to today. The paper then proceeds to present the expected progress in different fields to be open by nanotechnologies. A separate part of the presentation is connected with financial fundings in the field in the world and in our country. Examples are given which show that nanotechnologies could give a substantial contribution to the benefit of the mankind. At the end of the presentation it is said that all countries with organized science already have national strategies in the field and that "nanoscience and nanotechnologies are the long-term goal of the researchers of all nations in the 21th century. Regretfully, no such strategy exists in our country.

NANOTECHNOLOGIES AS A GLOBAL TASK OF RESEARCHERS IN 21st CENTURY

Zoran Djurić